

УДК 551.345; 551.343.74; 556.3

**ГИГАНТСКИЕ НАЛЕДИ-ТАРЫНЫ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ ПО
ДАНЫМ КАДАСТРА (1958 г.) И КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ 1973-
2021 гг.**

***Макарьева О.М.^{1,2}, А.Н. Шихов^{1,3}, Землянскова А.А.^{1,2}, В.Р. Алексеев⁴,
Нестерова Н.В.^{1,5}, Осташов А.А.^{1,5}**

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о
Земле, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9, Россия

² Северо-Восточный государственный университет, 685000, г. Магадан, ул.
Портовая, 13, Россия

³ Пермский государственный национальный исследовательский
университет, 614068, Пермь, ул. Букирева, 15, Россия

⁴ Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, 677010,
Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия

⁵ Государственный гидрологический институт, 199053, Санкт-Петербург,
2-я линия В. О., 23, Россия

*Автор для контакта, o.makareva@spbu.ru, omakarjeva@yandex.ru

Приведены сведения о фактической максимальной площади (не менее 10 км²) 71 крупнейшей наледи-тарыне Северо-Востока России по результатам дешифрирования космических снимков Landsat в 2013-2018 гг. (661 км²) и Sentinel-2 в 2020-2021 гг. (838 км²). Суммарная площадь наледей оказалась не менее, чем в два раза ниже суммарной величины площади наледных полей, указанной в Кадастре наледей Северо-Востока (1958) (1680 км²). Для 42 объектов по данным Landsat/MSS также получены данные о площади за 1973-1975 гг. (до начала периода потепления климата). Суммарная величина составила 555 км², что близко к современным оценкам за 2020-2021 гг. (581 км²), и в среднем в 1.9 раз ниже суммарной площади по

данным Кадастра (1958) (1083 км²). Несмотря на то, что отдельные гигантские наледы проявляют очень высокую межгодовую изменчивость, их площадь год от года может меняться до двух раз (100 %), в среднем для большинства наледей эта величина составляет около 20 %. На многочисленных примерах установлено несоответствие контуров наледных полей и границ ледяных массивов. Суммарная площадь наледных полей, как указанных в Кадастре 1958 г., так и выделенная на основе современных космоснимков, значительно превышает фактическую площадь распространения наледей. Оценка площади наледей (даже максимальных в многолетнем периоде) по размерам наледных полей может приводить к значительным ошибкам в расчетах динамических запасов наледобразующих подземных вод и других характеристик. В период после 1973-75 гг. кардинального изменения характеристик наледности Северо-Востока не зафиксировано. Необходимы дальнейшие натурные исследования гигантских наледей для выявления причин их изменчивости, в том числе постановки долгосрочных режимных наблюдений на специальных наледных полигонах.

Ключевые слова: гигантские наледы-тарыны, снимки Landsat, Кадастр наледей, наледная поляна, Северо-Восток России

Ссылка для цитирования: Макарьева О.М., А.Н. Шихов, Землянскова А.А., В.Р. Алексеев, Нестерова Н.В., Осташов А.А. Гигантские наледы-тарыны Северо-Востока России по данным кадастра (1958) и космическим снимкам 1973-2021 // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 6, с. ?-?. DOI: 10.15372/KZ20230201.

**GIANT AUFEIS-TARYN OF THE NORTH-EAST OF RUSSIA
ACCORDING TO THE CADASTRE (1958) AND SPACE IMAGES 1973-
2021**

***Makarieva O.M.^{1,2}, Shikhov A.N.^{1,3}, Zemlianskova A.A.^{1,2}, Alexeev V.R.⁴, Nesterova N.V.^{1,5}, Ostashov A.A.^{1,5}**

¹ *St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Universitetskaya nab. 7-9, St. Petersburg, 199034, Russia*

² *North-Eastern State University, 13 Portovaya str., Magadan, 685000, Russia*

³ *Perm State University, Bukireva str. 15, Perm, 614068, Russia*

⁴ *Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia*

⁵ *State Hydrological Institute, 199053, St. Petersburg, 2nd line, 23, Russia*

*Corresponding author, omakareva@spbu.ru, omakarieva@yandex.ru

Data on the actual maximum area of 71 largest aufeis-taryn in the North-East of Russia (with an area of at least 10 km²) based on the results of interpretation of Landsat satellite images in 2013-2018 (661 km²) and Sentinel-2 in 2020-2021 (838 km²) is presented. The total area of aufeis fields turned out to be at least two times lower than the total area of aufeis glades indicated in the Cadastre of aufeis of the North-East (1958) (1680 km²). For 42 objects the area for 1973-1975 were also obtained according to Landsat/MSS data (before the beginning of the warming period). The total value was 555 km², which is close to modern estimates for 2020-2021 (581 km²), and on average 1.9 times lower than their total area according to the Cadastre (1958) (1083 km²). Despite the fact that individual giant aufeis show very high interannual variability, their area can change up to two times from year to year (100%), on average for most aufeis fields this value is about 20%. On numerous examples, a discrepancy between the contours of aufeis glades and the boundaries of aufeis fields was established. The total area of aufeis glades, both indicated in the Cadastre (1958) and identified on the basis of modern space images, significantly exceeds the actual area of aufeis. Estimating the area of aufeis (even the maximum in a long-term period) by the size of aufeis glades can

lead to significant errors in the calculation of the dynamic reserves of aufeis groundwater and other characteristics. In the period after 1973-75 significant change of total aufeis area in the North-East were not identified. Further field studies of giant aufeis are important to identify the causes of their variability, including the establishment of long-term regime observations at special aufeis research plots.

Key words: giant aufeis-taryn, Landsat images, Cadastre (1958), aufeis glade, North-East of Russia

ВВЕДЕНИЕ

Северо-Восток России характеризуется широким распространением гигантских наледей, площадь некоторых из них достигает нескольких десятков км² [Атлас., 2021]. Наиболее крупные наледи встречаются в бассейне р. Индигирки. Широко известна Большая Момская наледь, площадь которой в период максимального развития, по историческим сведениям, достигала 82 км². Ранее она считалась самой большой в мире [Шепелев, 1972].

Первую систематизацию гигантских наледей Северо-Востока России выполнили геологи А.С. Симаков и З.Г. Шильниковская на основе анализа результатов аэрофотосъёмки 40-50-х гг. [Симаков, Шильниковская, 1958]. Составленные ими Кадастр и Карта наледей (далее Кадастр) содержат сведения о местоположении и размерах ледяных полей площадью не менее 0.01 км². Размеры наледей определялись посредством дешифрирования черно-белых фотоснимков, выполненных после схода устойчивого снежного покрова по выделенным контурам наледных полей.

Еще А.С. Кузнецов [1962] писал о том, что сведения из Кадастра следует использовать с осторожностью. На аэрофотоснимках верховьев бассейна р. Колымы за 1956-1959 гг. он не обнаружил ряд наледей,

указанных в Кадастре, а также зафиксировал более 2000 «новых» наледей, не учтенных предыдущими исследователями. Причинами таких расхождений А.С. Кузнецов указал несовершенство методики составления карты наледей по дешифрированию аэрофотоснимков летнего периода, а также тот факт, что не все наледи действуют ежегодно. А.С. Кузнецов также отметил, что крупные наледи отмечаются на определенных участках ежегодно.

Материалы Кадастра использованы многими учеными для формирования представлений о геокриологических условиях, естественных ресурсах подземных вод криолитозоны Северо-Востока России, взаимосвязи подземных и поверхностных вод в регионе [Толстихин, 1974; Соколов, 1975; Корейша, 1986]. До сих пор основополагающими научными работами по оценке ресурсов подземных вод Северо-Востока России являются исследования О.Н. Толстихина [1974]. Оценка ресурсов подземных вод выполнена расчетными методами с использованием данных о площади и соответствующих им объемах наледей. Основная расчетная характеристика – площадь наледи в период максимального развития – принималась равной площади наледной поляны по материалам А.С. Симакова и З.Г. Шильниковской [1958]. По расчетам О.Н. Толстихина в наледях Северо-Востока России ежегодно фиксируется 26.2 км³ подземных вод, что составляет около 36.5 % естественных ресурсов подземных вод зоны свободного водообмена. Эти же сведения приведены и в монографиях [Гидрогеология СССР, 1970; 1972].

В 2019 г. выполнено обновление данных о гигантских наледях бассейна р. Индигирки на основе дешифрирования снимков Landsat за 2013-2017 гг. [Макарьева и др., 2019]. Картографические работы были продолжены в пределах других бассейнов рек, в результате опубликован Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России [Атлас., 2021; Макарьева и др., 2022; Алексеев и др., 2023], а также разработаны 4 базы данных, содержащих

информацию о местоположении и характеристиках наледей в современных гидроклиматических условиях [*Свидетельство...*, 2021 а,б,в,г].

Сравнение данных о площади наледей в бассейнах крупных рек Северо-Востока России (Яны, Индигирки, Колымы, Пенжины) и на Чукотском полуострове выявило, что современное количество наледей в 1.3-1.5 раза больше, чем указано ранее в Кадастре, а общая максимальная площадь наледей в 1.6-2.4 раза меньше площади наледных полей Кадастра в зависимости от бассейна реки. Наибольшее расхождение между данными Кадастра и современными материалами характерно для Чукотского полуострова [*Атлас...*, 2021]. По оценкам [*Атлас...*, 2021] наледные ресурсы бассейнов рек Яна, Индигирка, Колыма, Пенжина и Чукотского полуострова (без учета наледей в бассейнах р. Лены и рек Охотского моря) составляют около 10.6 км³.

За всю историю изучения наледей поднимались вопросы, связанные с изучением их как мерзлотно-гидрогеологических явлений [*Романовский, 1973*], регуляторов речного и подземного стока [*Соколов, 1975; Makarieva et al., 2022*], связи с тектоническими разломами и таликами [*Романовский, 1983*].

Существенные различия в оценках наледности, динамических запасов наледнеобразующих подземных вод и других характеристик требуют рассмотрения следующих фундаментальных вопросов.

- 1. Уменьшилась ли фактическая площадь наледей Северо-Востока с периода их первой каталогизации на основе материалов 40-50-х гг. прошлого века в связи с изменением мерзлотно-гидрогеологических условий? Какая вариация характеристик наледности может быть отнесена к межгодовой изменчивости, а в каких случаях можно определенно говорить о затухании наледных процессов?

- 2. Является ли площадь наледной поляны адекватным индикатором фактической площади наледи, а в расчетах ресурсов подземных вод – ее объема?

Несмотря на наличие периодов повышенного или более умеренного наледообразования, незначительные по амплитуде колебания климата не влияют на морфометрические параметры крупных наледей, в то время как более мелкие наледи реагируют даже на изменение одного метеорологического параметра, меняя свое положение, размер, исчезая и появляясь в разные годы [Атлас., 1997]. Поэтому целью данной работы стала оценка межгодовой изменчивости площади наиболее крупных наледей (размером не менее 10 км²), выделенной по космоснимкам за период с 1973 по 2021 гг., а также сравнение фактической площади наледей с площадью наледных полей по материалам Кадастра [Симаков, Шильниковская, 1958] и космическим снимкам. Исследования многолетней и внутригодовой изменчивости наледей проводились многими авторами [Алексеев, 2016; Романовский, 1983; Шепелев, 1972; Zemlianskova et al., 2023 и др.], но дать однозначный ответ о реакции наледей на изменения климата пока не удалось [Поморцев и др., 2010].

МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа использовались данные Кадастра, космические снимки Landsat за период с 1973 по 2018 г. и Sentinel-2 за период 2020-2021 гг. Выделение контуров наледей по снимкам Landsat и Sentinel-2 производилось по пороговым значениям нормализованного разностного снежного индекса NDSI, принятым ранее в работе [Макарьева и др., 2019]. Фактическая площадь льда на дату снимка за конкретный год с 2013 по 2018 гг. корректировалась до максимальной величины по методу Б.Л. Соколова [1975]. По снимкам Landsat/MSS за 1973-1975 гг. положение ледяных полей

определялось на основе их высокой яркости в красном канале спектра. Расчет NDSI по этим снимкам невозможен по причине отсутствия среднего инфракрасного канала.

С целью выявления возможных различий определения площади наледей с помощью NDSI и по порогу яркости в красном канале для 10 случайно выбранных наледей площадь была определена обоими методами. В среднем площадь наледей, определенная по порогу яркости в красном канале, оказалась на 2.1% меньше площади, определенной с применением NDSI, а расхождение для отдельных наледей составило от -10.2% до 5.4% их площади. Таким образом, оценку площади наледей разными методами можно считать сопоставимой (хотя при использовании снимков MSS дополнительная погрешность может возникать за счет их более низкого пространственного разрешения).

В отличие от выделения по снимкам площади наледного льда, выделение наледных полей не лишено субъективности и сложно поддается автоматизации [Марков и др., 2016]. Основным признаком наледной поляны на снимках Landsat и Sentinel-2 является разветвление русла на множество протоков, обусловленное переработкой речной поймы наледью. Другие признаки имеют меньшее значение и зависят от сезона съемки. В рамках настоящей работы по снимкам Sentinel-2, полученным в середине летнего сезона и представленным в спектральном синтезе «средний ИК – ближний ИК – красный», были оцифрованы вручную контуры 27 наледных полей. Были выбраны наледи, площадь которых по данным Кадастра превышает современную площадь льда, выявленную по спутниковым снимкам. Границы наледных полей были выделены по характерным признакам на снимке, основными из которых являются разветвление русла реки на множество

мелких протоков, а также слабое развитие растительности в сравнении с прилегающей территорией.

Общий период космосъемок был разбит на три временные группы: 1) 1973-1975 гг., 2) 2013-2018 гг., 3) 2020-2021 гг. Для каждой наледи разница дат между снимками второй и третьей временной группы составляет не менее трех лет. Выбирались наиболее ранние весенние даты снимков (14 мая – 7 июня в 1973-1975 гг., 18 мая – 19 июня в 2013-2018 гг., 12 мая – 8 июня в 2020-2021 гг.). Использование в анализе данных снимков за три периода позволило значительно уменьшить неопределенность, обусловленную межгодовой изменчивостью площади отдельных наледей.

Всего рассмотрено 72 наледи (рис. 1). Их выбор определялся по двум источникам – Кадастру и космоснимкам Landsat и Sentinel-2. Таким образом, в число рассматриваемых наледей попали те, которые имеют площадь льда по космоснимкам или наледной поляны по Кадастру не менее 10 км². По данным Кадастра площадь рассматриваемых наледей составляла 1707 км² (16% от общей площади 10444 км² и 1% от общего количества 7448 наледей, информация о которых приведена в Кадастре), максимальные и минимальные величины по данным Кадастра составили 82 и 3.84 км², соответственно. За первый период (1973-1975 гг.) получены данные только для 42 наледей из 72. В некоторые периоды данные для отдельных наледей отсутствовали (из-за облачности на снимках). Одна из наледей, по данным Кадастра формирующаяся на Чукотском полуострове (25.7 км²), не была идентифицирована ни на одном из космоснимков.

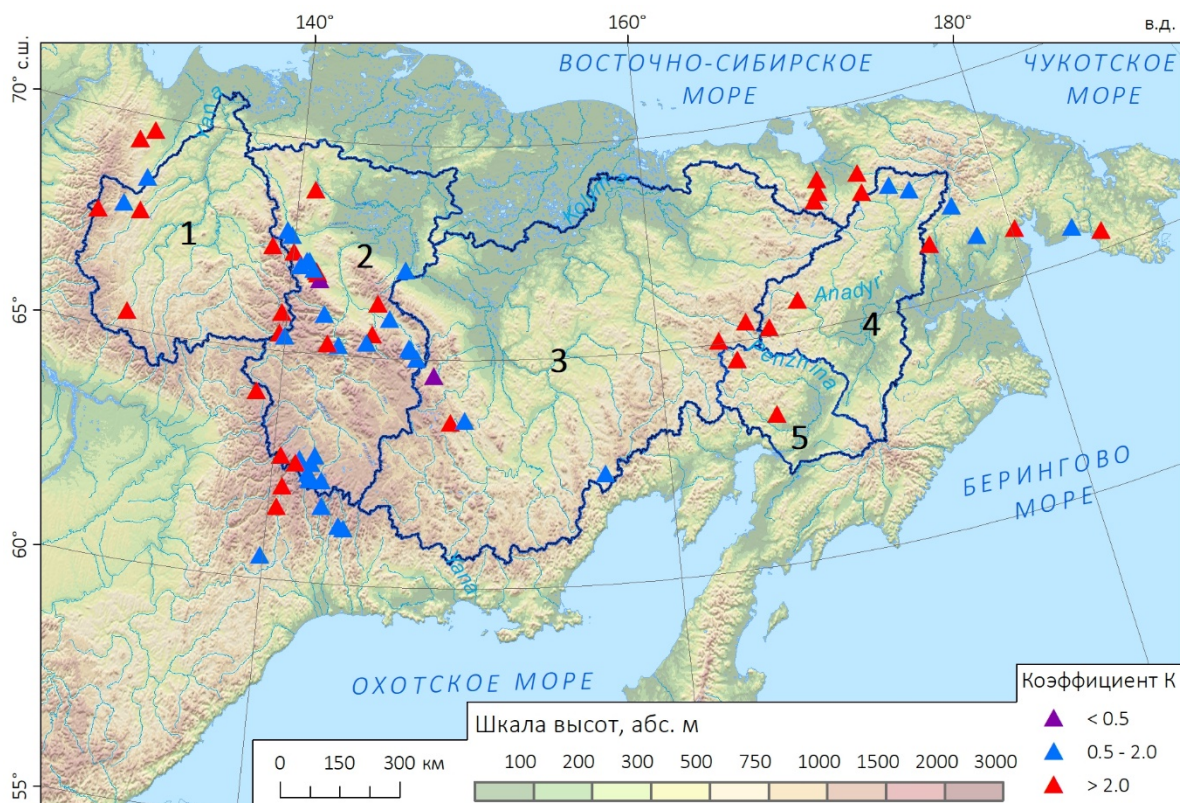


Рис. 1. Схема расположения гигантских наледей-тарынов площадью более 10 км². Цифрами показаны бассейны рек: 1 – Яна, 2 – Индигирка, 3 – Колыма, 4 – Анадырь, 5 – Пенжина.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлены результаты сравнения данных о размерах самых крупных наледей в регионе по четырем периодам измерений. Площадь каждого из ледяных массивов показана различными цветами, соответствующими источникам данных, последовательно в порядке убывания площади наледных полей по данным Кадастра. На рис. 2 видно, что для большей части наледей площадь наледных полей, указанных в Кадастре, значительно превышает площади ледяных массивов, измеренных в более поздние периоды, при этом оценка площади наледей по снимкам за

1973-1975 гг. практически совпадает с современными материалами 2020-2021 гг.

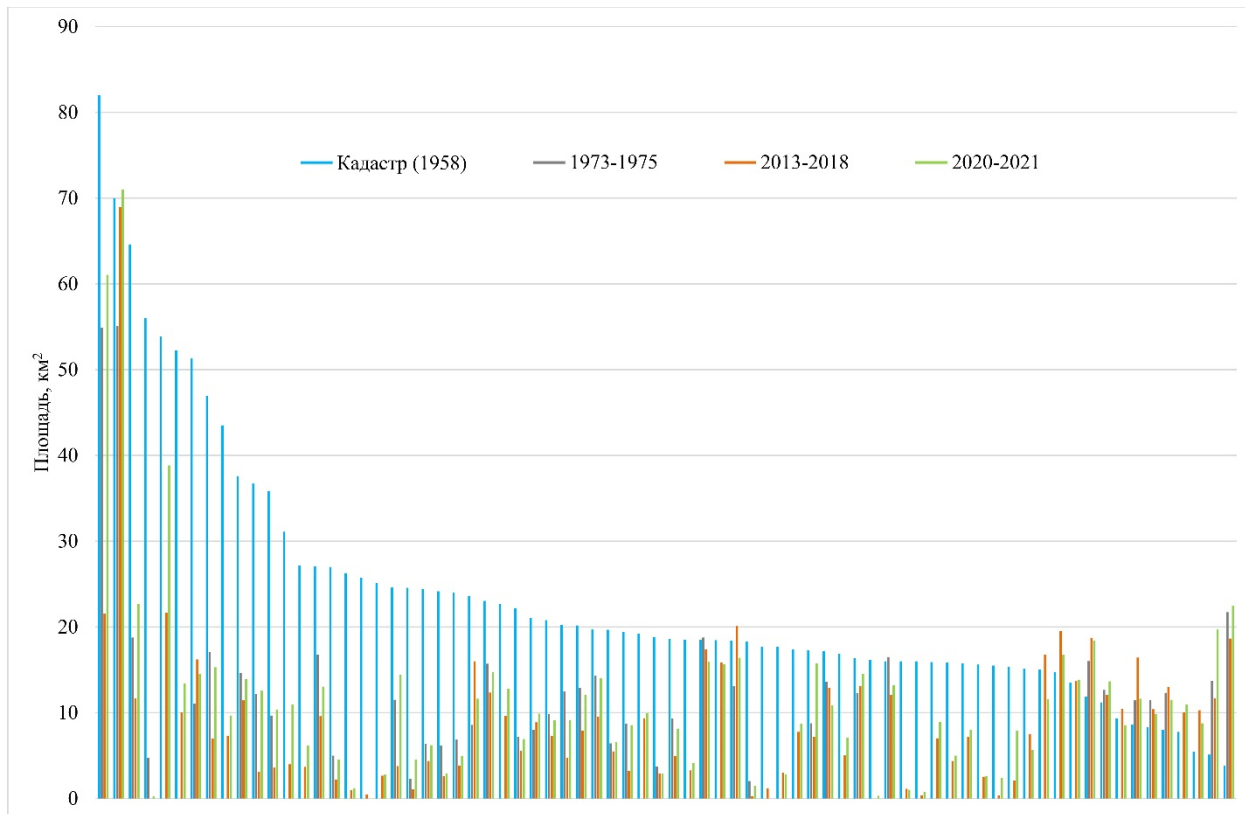


Рис. 2. Соотношение площадей наледных полей по данным Кадастра и площадей гигантских наледей-тарынов по снимкам Landsat/Sentinel-2 1973-2021 гг. Наледи приведены в порядке убывания площади по данным Кадастра.

Наледи (рис. 1) разбиты на три группы в зависимости от отношения площади, указанной в Кадастре, к средней площади, определенной по снимкам за два или три временных промежутка (K) (рис. 3). Красными треугольниками отмечены 35 наледей, площадь которых по снимкам Landsat (1973-2021 гг.) как минимум в два раза меньше величин, указанных в Кадастре, то есть $K > 2$, из них 21 наледь характеризуется коэффициентом $2 > K < 5$, а еще 14 наледей – $5 < K < 25$. Фиолетовым цветом маркированы две

наледы, площадь которых была значительно недооценена по данным Кадастра, $K < 0.5$. Голубые значки идентифицируют 34 наледы, размеры которых различаются менее чем в два раза ($0.5 < K < 2$), колебания площади этих наледей условно можно отнести к межгодовой изменчивости.

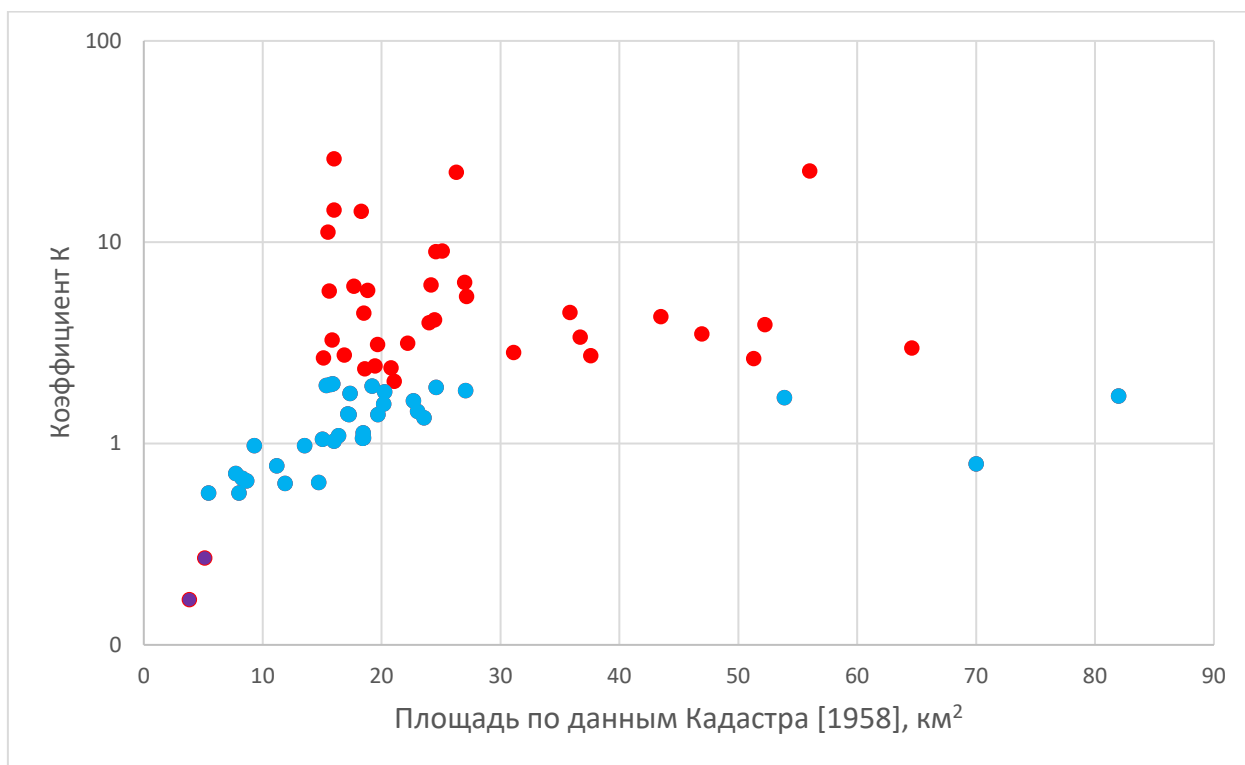


Рис. 3. Распределение коэффициента K относительно площади, указанной в Кадастре [1958]. Цвета соответствуют Рис. 1.

Общая площадь 71 наледы по Кадастру [Симаков, Шильниковская, 1958] составила 1680 км², по снимкам 2013-2018 гг. – 661 км², а в 2020-2021 гг. – 838 км² (табл. 1). Таким образом, отношение общей фактической площади наиболее крупных наледей в сравнении с данными Кадастра о площади наледных полей составило 1.9-2.5 раз. Эта величина близка к оценкам, полученным для всей совокупности наледей-тарынов Северо-Востока различного размера, приведенным в [Атлас..., 2021].

Таблица 1. Суммарные площади наледных полей по данным Кадастра [Симаков, Шильниковская, 1958] и наледей по снимкам Landsat и Sentinel-2 (км²)

| Количество наледей | Период | | | |
|--|---------|-----------|-----------|-----------|
| | Кадастр | 1973-1975 | 2013-2018 | 2020-2021 |
| 72 | 1706 | - | - | - |
| Все рассматриваемые наледи, выявленные по снимкам | | | | |
| 71 | 1680 | - | 661 | 838 |
| Наледи, для которых доступны снимки за 1973-1975 гг. | | | | |
| 42 | 1083 | 555 | 444 | 581 |

Из 66 наледей, площадь которых по данным Кадастра превышает 10 км², только 30 в современный период достигают этого порога, 17 имеют площадь от 5 до 10 км², площадь остальных 16 наледей в среднем составляет 2.6 км². Еще 8 наледей в современном климате имеют площадь выше, чем указана в Кадастре.

Наиболее значительно размеры наледей различаются на Чукотском полуострове. Суммарная площадь ледяных массивов здесь составляет всего 45% от величины, указанной в Кадастре. В монографии [Гидрогеология, 1972, с. 86] приведены сведения о наледях в бассейнах отдельных рек Чукотского полуострова: «...в Анадырском районе 69 массивов, из них 34 имеют площадь от 4 до 56 км². Наиболее крупные наледи этого района расположены на реках Нунямовеем – 56 км², Танюрер – 53.8 км², Кэнынын – 25.7 км², Сутакан – 24 км², Пыкарваам – 18 км², Эчкакек – 17.7 км², Тнэквеем – 15.3 км², Койвэльвэгыргываам – 13 и 9 км². В долинах рек Чаун-Чукотского района зарегистрированы очень крупные наледи, 39 из которых имеют площадь от 4 до 47 км²». Большая часть указанных гигантских наледей с

площадью более 10 км² на Чукотском полуострове на снимках Landsat за период 1973-1975, 2012-2021 гг. имеет значительно меньшую площадь.

Вместе с тем, имеется 21 наледь, современные размеры которых практически совпадают с данными Кадастра, вариация коэффициента К для этой группы составляет от 0.5 до 1.5. На рис. 4 представлена наледная поляна на р. Малый Пыкарваам (бассейн р. Анадырь) на снимке Sentinel-2 в естественных цветах. Это одна из немногих наледей Чукотского полуострова, размеры которой по современным спутниковым снимкам и по данным Кадастра практически совпадают (20 и 21.3 км² соответственно).



Рис. 4. Наледная поляна на р. Малый Пыкарваам на снимке Sentinel-2 (дата съемки 17.08.2019 г.) в естественных цветах. Площадь, покрытая льдом: 1 – максимальная 01.06.2019 г., 2 – минимальная 04.09.2019 г.

Отмечается также серия наледей, размеры которых в современных условиях значительно выше, чем указанные в Кадастре. Площадь последней

наледи на рис. 2 15 мая 2021 г. составляла 22.5 км², тогда как по Кадастру не превышала 3.8 км².

2013-2018 гг. условно могут быть отнесены к периоду пониженной наледности, разница в площади наледей по сравнению с 2020-2021 гг. составляет 23.4%. Однако, большая площадь наледей в 2020-2021 гг. в сравнении с 2013-2018 гг. может также частично объясняться увеличением повторяемости съемки за счет появления нового источника данных (снимков Sentinel-2). Это позволило более точно фиксировать площадь наледей, близкую к максимальной (т.е. сразу после схода снежного покрова).

Для расчета ресурсов подземных вод традиционно используется формула зависимости объема от площади наледи: $W=aS^n$, где W – объём льда (тыс. м³); S – площадь льда, тыс. м²; a, n – коэффициенты [Соколов, 1975]. Ландшафтно-климатические условия формирования наледей влияют на величину расчетных коэффициентов. В работе [Землянкова и др., 2023] были систематизированы все известные наборы параметров указанной формулы, опубликованные в прошлом веке, а также на основе анализа современных данных по Анмангындинской наледи (верховья бассейна р. Колыма) предложены новые значения. Расчетный суммарный объем 42 наледей в период 1973-2021 гг. в два раза ниже, чем по данным Кадастра (табл. 2). Объем наледей 2020-2021 гг. на 6% (75 млн м³) больше величины 1973-1975 гг. Максимальная разница (1.2 км³) между двумя периодами отмечается для наледи, площадь которой по данным Кадастра (1958 г.) составила 56 км², а по космоснимкам 4.74 км² (1975 г.) и 0.21 км² (2021 г.).

Таблица 2. Суммарный расчетный объем 42 наледей по данным Кадастра [Симаков, Шильниковская, 1958] и наледей по снимкам Landsat (1973-1975) и Sentinel-2 (2020-2021) (км³)

| Коэффициенты a/n | Период |
|--------------------|--------|
|--------------------|--------|

| | Кадастр [1958] | 1973-1975 | 2020-2021 |
|---|-------------------|-----------|-----------|
| 0.364 / 1.167 [<i>Землянскова и др., 2023</i>] | 2.23 | 1.03 | 1.10 |
| 0.96 / 1.094 [<i>Соколов, 1975</i>] | 2.75 | 1.33 | 1.41 |
| 0.75 / 1.12 [<i>Соколов, Саркисян, 1981</i>] | 2.82 | 1.34 | 1.42 |
| 0.511 / 1.146 [<i>Толстихин, 1975</i>] <u>1974</u>] | 2.52 | 1.18 | 1.25 |
| Среднее значение | 2.58 | 1.22 | 1.30 |

В работе [*Романовский и др., 1970*] дана оценка динамических ресурсов подземных вод, рассчитанная по величине наледного питания в воднокритический период для бассейна р. Уяндина (левый приток р. Индигирка) на основе результатов экспедиционных работ. Была получена более низкая величина модуля наледного стока 0.78 л/с по сравнению с данными О.Н. Толстихина (1.5-2 л/с), что авторы также напрямую связали с завышенными площадями наледей, величина которых принималась О.Н. Толстихиным равной площади наледных полей и наледных долин, приведенных в Кадастре.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ~~ЧЕГО?~~

На основе детального анализа результатов попробуем ответить на поставленные во введении вопросы. Вероятной причиной ***сокращения фактической площади наледей по сравнению с периодом первой каталогизации наледей Северо-Востока*** является трансформация мерзлотно-гидрогеологических условий наледообразования. Она может быть связана с процессами изменения климата, современными тектоническими

подвижками и/или антропогенным воздействием в результате добычи минеральных ресурсов.

По материалам метеорологических наблюдений была установлена цикличность климата: чередование холодных и тёплых периодов, но с неуклонным трендом потепления. В работе [Балобаев и др., 2003] отмечается, что с конца 19 в. среднегодовые температуры воздуха повысились на 2–3.5 °С, а зимние - на 5–10 °С, отчетливое повышение температуры воздуха началось в 70–80-х гг. Например, на Северо-Востоке России с 70-х гг. средняя годовая температура воздуха выросла на 2.2 °С [Makarieva et al., 2019]. В ряде мест это привело к трансформации геокриологических условий, повысилась температура и мощность деятельного слоя многолетнемерзлых пород, изменились сроки промерзания слоя сезонного оттаивания [Makarieva et al., 2019; Melnikov et al., 2022], процессы водообмена и пути миграции подземных вод [Bring et al., 2016]. Перестройка мерзлотно-гидрогеологических структур, сокращение дебита родников или их исчезновение может являться причиной угасания процессов наледообразования вплоть до полного их прекращения. В последнем случае на месте ежегодно формирующихся ледяных полей остается реликтовая наледная поляна [Алексеев, 2005].

Снижение наледности в регионе может также происходить в результате перехода выходящих на поверхность наледообразующих вод в категорию транзитных, т.е. фильтрующихся в толще аллювиальных отложений. В настоящее время многие исследователи отмечают увеличение зимнего стока рек криолитозоны России и мира [Spence et al., 2011; Tananaev et al., 2016]. Например, в [Макарьева, Нестерова, 2020] приведены сведения о повышении зимнего меженного стока в бассейнах рек Яна и Индигирка, при

этом резкие изменения гидрологических характеристик произошли в основном в период 1991-1996 гг.

Рассмотрим более подробно результаты анализа самых ранних спутниковых снимков, на основе которых выявлено значительное несовпадение площадей 42 гигантских наледей по сравнению с данными Кадастра. Они относятся к 1973-1975 гг., *то есть к периоду, предшествующему началу периода современного изменения климата.* Суммарные величины площади наледей в 1973-75 гг. 555 км² близки к современным величинам в 2020-21 гг. 581 км² (табл. 1).

Введем показатель межгодовой изменчивости индивидуальной наледи R , как отношение максимальной площади к минимальной, выбранные в любой из обоих периодов. Для 38 из 42 индивидуальных наледей показатель R изменяется от 1.02 до 1.44 (разница дат в различные периоды не более 7 дней), еще для 3 наледей $1.8 < R < 2.1$ (разница дат до 3 недель). Еще одна налесь с наледной поляной по данным Кадастра 56 км² имела площадь 0.21 км² 7 июня 1973 года и 2.48 км² 30 мая 2021 г. ($R=22.6$). Медиана R для всех 42 наледей составляет величину 1.2 (рис. 5).

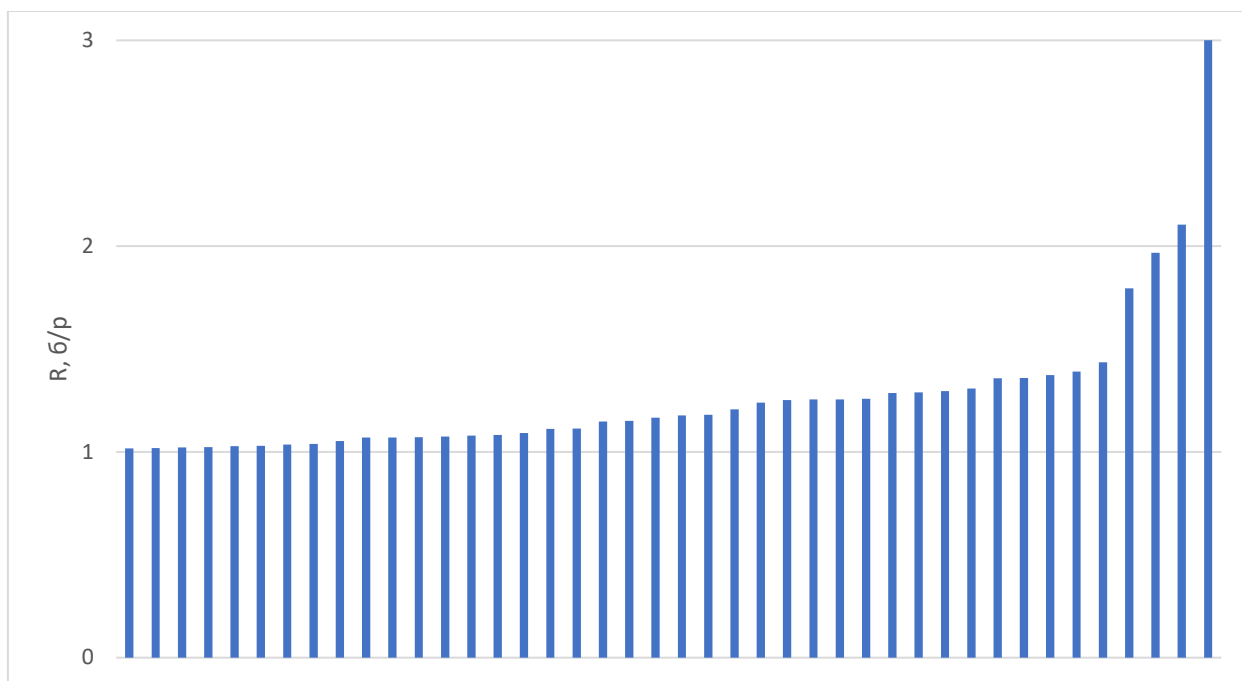


Рис. 5. Показатель межгодовой изменчивости (R) 42 наледей. Последнее максимальное значение (22.6) отражено не в масштабе вертикальной шкалы. Значения приведены в порядке возрастания (R).

Интерес также представляют самые большие наледи мира. Площадь Большой Момской наледи (первая наледь на графике рис. 2) скорее всего никогда не достигала 82 км², указанных в Кадастре [Симаков, Шильниковская, 1958], так как площадь наледной поляны не превышает 72 км². Вторая крупнейшая наледь на рис. 2 – это ледяной массив в бассейне р. Сюрюктях (левый приток р. Индигирки). В настоящее время она является самой большой в мире, ее площадь на всех рассмотренных снимках превышает размеры Большой Момской наледи (табл. 3), и в 2012 г. она превысила 81 км². Показатель межгодовой изменчивости этих наледей R составляет 1.90. Для Сюрюктяхской наледи можно отметить значительную разницу площади в смежные 1973 и 1974 гг., она составила более 40% (табл. 3).

Таблица 3. Площадь Большой Момской наледи и крупнейшей наледи в бассейне р. Сюрюктях в весенний период

| Большая Момская наледь | | Наледь в бассейне р. Сюрюктях | |
|------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Дата съемки | Площадь наледи, км ² | Дата съемки | Площадь наледи, км ² |
| | | 19.05.1973 | 73.51 |
| | | 31.05.1974 | 42.70 |
| 08.05.2005 | 66.20 | 29.05.2005 | 69.67 |
| 27.05.2006 | 57.90 | 04.06.2007 | 52.50 |
| | | 21.05.2008 | 67.73 |
| 19.06.2009 | 39.50 | 17.06.2009 | 45.06 |
| | | 18.05.2010 | 69.80 |
| 25.05.2011 | 61.78 | | |
| 27.05.2012 | 49.60 | 23.05.2012 | 81.46 |
| 15.05.2013 | 48.15 | 27.05.2013 | 56.87 |

| | | | |
|------------|-------|------------|-------|
| | | 21.05.2014 | 78.01 |
| 28.05.2015 | 49.08 | 31.05.2015 | 71.29 |
| 15.05.2016 | 45.79 | 27.05.2016 | 77.78 |
| | | 04.06.2016 | 68.99 |
| 24.05.2017 | 44.72 | 07.06.2017 | 62.60 |
| 25.05.2018 | 34.92 | 07.06.2018 | 46.23 |
| 22.05.2019 | 53.60 | 28.05.2019 | 61.14 |
| 16.05.2020 | 55.01 | 21.05.2020 | 64.06 |

Одной из наиболее изученных наледей является Анмангындинский тарын, формирующийся в долине одноименной реки в верховьях бассейна р. Колымы. Хотя площадь этой наледи в период с 1962 г. по 2022 г. изменялась от 3.5 до 6.8 км², не достигая 10 км², наличие исторических данных позволяет использовать этот объект в данном анализе. С 1962 г. наблюдается статистически значимый тренд сокращения площади Анмангындинской наледи, величина которого к современному периоду составила 25% [Землянскова и др., 2023]. Межгодовая изменчивость R за последние 60 лет составляет для этой наледи величину 1.94.

В работе [Романовский, 1983] приведены результаты полевого исследования в 1972 г Ойсордоохской и Кыро-Нехаранских наледей, картированных в 1939 и 1935 гг. П.Ф. Швецовым и В.П. Седовым [1941]. Несмотря на то, что наледи расположены в Селенняхской впадине (бассейн р. Индигирки) на расстоянии не более 30 км друг от друга, изменения их площади было разнонаправленным – площадь Ойсордоохской наледи увеличилась на 30%, а площадь комплекса Кыро-Нехаранских наледей уменьшилась.

Приведенные факты указывают на высокую межгодовую изменчивость площади отдельных наледей, однако в целом согласно данным 1973-2021 гг. для большинства наледей этот показатель не превышает величины 1.5, а медианная характеристика составляет 1.2. Общая фактическая площадь

наиболее крупных наледей составляет величину в 1.9-2.5 раз меньше в сравнении с данными Кадастра о площади наледных полян. Эта величина близка к оценкам, полученным *для всей совокупности наледей-тарынов Северо-Востока* [Атлас., 2021].

Полученные результаты могут указывать на некорректность расчетных характеристик (например, величины динамических запасов наледееобразующих подземных вод), выполненных на основе данных Кадастра [Симаков, Шильниковская, 1958], либо на резкое изменение условий наледееобразования в регионе (не выявленного генезиса), произошедшее с конца 40-х по 70-е гг. прошлого века. Однако можно утверждать, что в период после 1973-75 гг. кардинального изменения характеристик наледности Северо-Востока не происходило, а предыдущие выводы авторов об уменьшении площади наледей в бассейне р. Индигирки были ошибочными [Макарьева и др., 2019].

Соответствие площади наледных полян и наледей. На рис. 6 представлены примеры выделения площадей наледных полян и контуров наледей на весенних снимках Sentinel-2, а также указаны площади наледных полян по данным Кадастра [Симаков, Шильниковская, 1958]. Разница площади отдельных индивидуальных наледных полян составила от 3 до 90%.

Всего по спутниковым снимкам было выделено 27 наледных полян площадью от 1.5 до 255 км² (по Кадастру – от 5.5 до 82.0 км²).

На двух примерах (рис. 6а,г) можно отметить значительное несоответствие площади наледных полян по данным Кадастра и выделенных по космическим снимкам. Также можно отметить, что на всех примерах рис. 6 фактические площади наледей в разы меньше площади наледных полян, выделенных как по современным снимкам, так и по данным Кадастра.

Из 71 рассмотренной гигантской наледи 12 представляют собой лишь набор отдельных мигрирующих ледяных полей, суммарная площадь которых

(78 км²) значительно ниже площади наледной поляны, указанной в Кадастре (288 км²). Б.В. Зонов [1944] отнес такие наледи к участкам, характеризующимся угасанием наледных процессов.

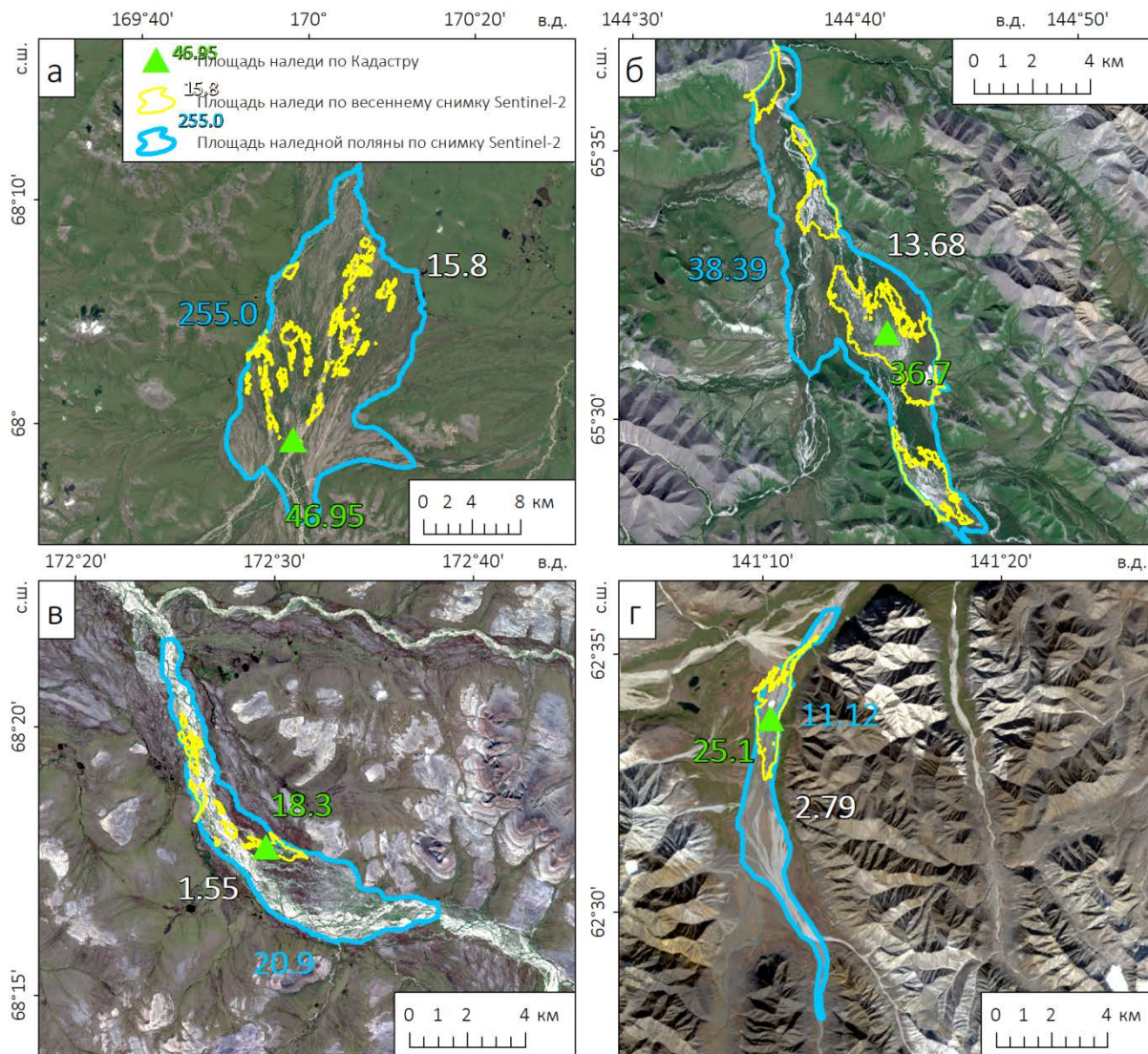


Рис. 6. Примеры соотношения площади наледных полей и максимальной площади наледи по снимкам Sentinel-2 на реках Люлювеем (а), Эрэкиит (б), Эльгыкаквын (в) и Агаякан (г). Цифры в поле снимка – площадь контуров соответствующего цвета, км².

В качестве примера угасания наледных процессов на рис. 7 представлены снимки Landsat 1974 и Sentinel-2 2019 гг. наледной поляны

реки Люлювеем, впадающей в Чаунскую губу. Здесь образуются отдельные наледные массивы размером до 0.8 км^2 , общая площадь которых превышает 17 км^2 . По данным Кадастра на этом участке реки площадь наледной поляны составляет 47 км^2 .

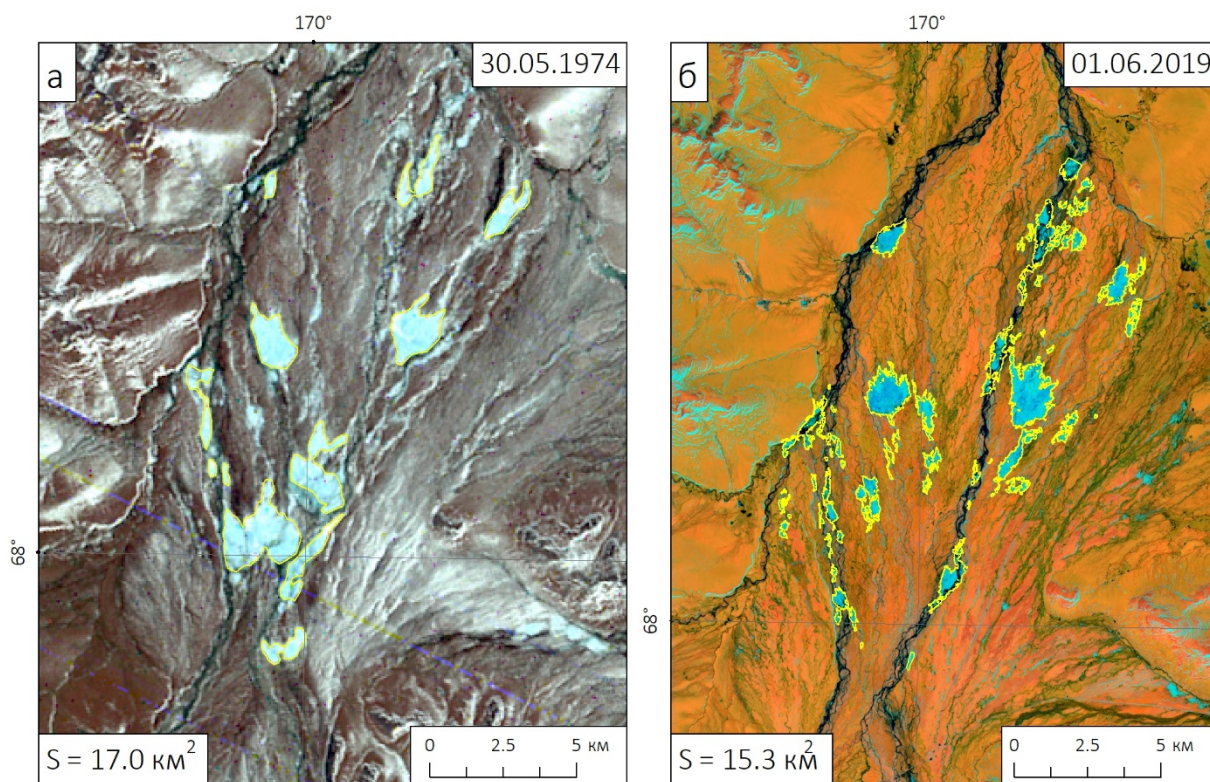


Рис. 7. Сравнение площади гигантской наледи в бассейне р. Люлювеем по снимкам Landsat/MSS (30.05.1974) (а) и Sentinel-2 (01.06.2019) (б). Желтым контуром выделена наледь.

Также выявлены 6 наледей, для которых площадь наледной поляны по Кадастру более чем в два раза превышает площадь наледной поляны, выделенной по снимкам Sentinel-2 (рис. 6г). Такие расхождения могут быть обусловлены субъективностью визуального выделения границ наледной поляны, особенно в тех случаях, когда несколько наледей расположены последовательно вдоль одного водотока, либо ошибками в данных Кадастра. В.Р. Алексеев и соавт. [2011] указывают на то, что «при использовании

метода ландшафтной индикации за пределами тайги и лесотундры отмечаются большие погрешности в определении параметров наледей», ошибка оценки наледности Северной Чукотки составляет 20–25%.

Н.Н. Романовский [1973], а также в других публикациях с соавторами [*Романовский и др., 1970; Афанасенко и др., 1975*], рассматривая геологическую роль и процесс миграции наледей, указывают на то, что направленная или циклическая многолетняя динамика наледей существенно расширяет их площадь воздействия на рельеф. В результате площади наледных полей значительно превышают размеры образующихся наледей.

Результаты нашего исследования на более широком материале подтверждают полученные ранее выводы Н.Н. Романовского [1973], о том, что оценка площади наледи (даже максимальной в многолетнем периоде) по размерам наледной поляны не рекомендуется. Использование в анализе снимков за период 1973-1975 гг. и их соответствие данным современного периода указывает на то, что суммарная площадь наледных полей, указанная в Кадастре, в 1.9 раза превышает фактическую площадь распространения наледей как в период его создания, так и в настоящее время.

ВЫВОДЫ

Анализ данных, полученных с помощью космических снимков Landsat и Sentinel-2 с 1973 по 2021 гг., и их сравнение с Кадастром наледей Северо-Востока России [*Симаков, Шильниковская, 1958*] выявили существенные различия в оценке площади для категории гигантских наледей площадью более 10 км².

1. Общая фактическая площадь наледей составляет величину в 1.9 раз меньше суммарной площади наледных полей, указанных в Кадастре. Из 72 рассмотренных наледей 35 имеют площадь, как минимум в два раза меньше указанной в Кадастре. Выявлены 13 наледей, площадь которых

увеличилась по сравнению с данными Кадастра. Суммарная площадь 42 наледей, полученных по снимкам 1973-1975 гг., составляет 555 км², что практически совпадает с данными за 2020-2021 гг. (581 км²), при этом общая площадь наледных полей по данным Кадастра – 1083 км².

2. Отдельные гигантские наледи проявляют очень высокую межгодовую изменчивость, их площадь год от года может меняться до двух раз (100 %), однако в среднем, для большинства наледей, эта величина составляет около 20 %.

3. В период после 1973-75 гг. кардинального изменения характеристик наледности Северо-Востока по результатам исследования не зафиксировано, а предыдущие выводы авторов [Макарьева и др., 2019] об уменьшении суммарной площади наледей в регионе были ошибочными.

4. На многочисленных примерах установлено несоответствие контуров наледных полей и границ наледей. Оценка площади наледи (даже максимальной в многолетнем периоде) по размерам наледной поляны не рекомендуется. Суммарная площадь наледных полей, указанная в Кадастре, значительно превышает фактическую площадь распространения наледей как в период его создания, так и в настоящее время.

5. Преувеличенные значения площади наледей определяют неточности в дальнейших расчетах динамических запасов наледообразующих подземных вод, величина которых (а также соответствующих характеристик речного стока) по данным Кадастра может быть завышена более, чем в два раза.

Использование наледей в качестве индикатора гидродинамических процессов в криолитозоне требует постановки долгосрочных режимных наблюдений на специальных наледных полигонах. Выявление причин изменчивости наледей позволит обеспечить более точную оценку запасов

природных вод в горных регионах Арктики и Субарктики, а также в других наледных областях России.

Благодарности. Авторы искренне благодарят двух анонимных рецензентов за конструктивные замечания и комментарии.

Исследования проводятся при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта № 94034170, обработка и анализ снимков Landsat за 1973-1975 гг. выполнен в рамках проекта Российского научного фонда № 23-17-20011 и содействии правительства Магаданской области.

Литература

- Алексеев В. Р.** Ландшафтная индикация наледных явлений. Новосибирск, Изд-во Наука, 2005, 363 с.
- Алексеев В.Р.** Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // Лёд и Снег, 2016, Т. 56, № 1, с. 73-92. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-73-92>
- Алексеев В.Р., Горин В.В., Котов С.В.** Наледи-тарыны Северной Чукотки // Лёд и Снег, 2011, № 4 (116), с. 85–93.
- Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н. и др.** Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России (2013–2019 гг.) // География и природные ресурсы, 2023, № 3, с. 136-143.
- Атлас** гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России // Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н. и др. / Под ред. В.В. Шепелев, М.Н. Железняк. Новосибирск. Изд-во СО РАН, 2021, 302 с.
- Атлас** снежно-ледовых ресурсов мира. М., Научный мир, 1997, 371 с.
- Афанасенко В.Е., Корейша М.М., Романовский Н.Н.** Наледные ландшафты Северо-Востока СССР // Материалы VI Съезда Геогр. о-ва СССР: Проблемы ландшафтоведения. Л., ~~КЕМ ИЗДАНО?~~ 1975, с. 78–81.
- Балобаев В.Т., Гаврилова М.К., Скачков Ю.Б. и др.** Обзор состояния и тенденций изменения климата Якутии. Под ред. Л.П. Филиппова. Якутск, Изд-во СО РАН, 2003, 64 с.
- Гидрогеология СССР** / Под ред. А.И. Ефимова, И.К. Зайцева. М., Недра, Т. 20: Якутская АССР, 1970, 383 с.
- Гидрогеология СССР** / Под ред. О.Н. Толстихина. М., Недра, Т. 26: Северо-Восток СССР, 1972, 297 с.
- Землянскова А.А., Алексеев В.Р., Шихов А.Н. и др.** Многолетняя динамика гигантской Анмангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962-2021 гг.) // Лед и Снег, 2023, Т. 63, № 1, с. 71-84.

Зонов Б. В. Наледи и полыньи на реках Янско-Колымской горной страны // Труды Ин-та мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР. М., Изд-во АН СССР, 1944, т. IV, с. 33–92.

Корейша М. М. Закономерности развития наземных льдов в условиях резко континентального климата. Автореферат дис. ... д-ра геогр. наук. АН СССР, Институт географии. М., 1986, 45 с.

Кузнецов А. С. Наледи и полыньи на Северо-Востоке СССР // Сб. работ по гидрологии. Л., Гидрометеиздат, 1962, № 2, с. 72–86.

Макарьева О.М., Алексеев В.Р., Шихов А.Н. и др. Картирование наледей Северо-Востока России // Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 4, с. 47–58.

DOI: 10.15372/KZ20220404

Макарьева О.М., Нестерова Н.В. Фазовое состояние осадков как фактор увеличения меженного стока в криолитозоне (на примере бассейнов Яны и Индигирки) // Метеорология и гидрология, 2020, №4, с. 95 – 103, DOI: 10.3103/S1068373920040081

Макарьева О. М., Шихов А. Н., Остахов А. А., Нестерова Н. В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам «Landsat» и историческим данным // Лед и Снег, 2019, Т. 59, № 2. с. 201-212.

Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В. Наледи зоны БАМ: Экспедиционные исследования. С.-Пб., изд-во Нестор-История, 2016, 320 с.

Поморцев О.А., Кашкаров Е.П., Попов В.Ф. Наледи: глобальное потепление климата и процессы наледеобразования (ритмическая основа долгосрочного прогноза) // Вестник ЯГУ, 2010, Т. 7, №2, с. 40–48.

Романовский Н.Н. О геологической деятельности наледей // Мерзлотные исследования, 1973, вып. XIII, с. 66-89.

Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М., Изд-во МГУ, 1983, 232 с.

Романовский Н.Н., Кондратьева К.А., Кудрявцев В.А. и др. Мерзлотные и гидрогеологические особенности района Депутатского рудного узла //

Мерзлотные исследования, 1970, Вып. X, с. 34-58.

Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2021620267 (от 12.02.2021а) / Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для

Чукотского полуострова. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А. **и др.**

Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2021620317 (от 24.02.2021б) / Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна

реки Индигирка. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А. **и др.**

Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2021620332 (от 26.02.2021в) / Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна

реки Колыма. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А. **и др.**

Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2021620333 (от 26.02.2021г) / Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна

реки Яна. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А. **и др.**

Симаков А.С., Шильниковская З.Г. Карта наледей Северо-Востока СССР.

Краткая объяснительная записка. Магадан, Северо-Восточное геологическое управление., 1958, 40 с.

Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. Л., Гидрометеиздат, 1975, 190 с.

Соколов Б.Л., Саркисян В.О. Подземное питание горных рек. Л.,

Гидрометеиздат, 1981, 239 с.

Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР.

Новосибирск, Изд-во Наука (Сиб. отд-ние), 1974, 164 с.

Швецов П. Ф., Седов В. П. Гигантские налееди и подземные воды хребта

Тас-Хаяхта. М.- Л., Изд-во АН СССР, 1941, 81 с.

Шепелев В.В. Оценка наледного питания и наледного стока бассейнов рек

Мома и Тихон-Юрях (притоки Индигирки) // Геокриологические и

гидрологические исследования Сибири. Якутск, Кн. изд-во, 1972, с. 187–190.

- Bring A., Fedorova I., Dibike Y. et al.** Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects and research challenges // *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences*, 2016, 121, pp. 621-629, <https://doi.org/10.1002/2015JG003131op>.
- Makarieva O., Nesterova N., Shikhov A. et al.** Giant Aufeis—Unknown Glaciation in North-Eastern Eurasia According to Landsat Images 2013–2019 // *Remote Sensing*, 2022, 14, pp. 4248, <https://doi.org/10.3390/rs14174248>
- Makarieva O., Nesterova N., Post D. et al.** Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost // *The Cryosphere*, 2019, 13, pp. 1635–1659, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1635-2019>
- Melnikov V., Osipov V., Brouchkov A. et al.** Past and Future of Permafrost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure // *Energies*, 2022, 15, pp. 3190, <https://doi.org/10.3390/en15093190>.
- Spence C., Kokelj S.V., Ehsanzadeh E.** Precipitation trends contribute to streamflow regime shifts in northern Canada—cold region hydrology in a changing climate // *IAHS Publication*, Wallingford, UK, 2011, vol. 346, pp. 3–8.
- Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S.** Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // *Geophys. Res. Lett.*, 2016, 43, pp. 10764–10772.
- Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov, A. et al.** The impact of climate change on seasonal glaciation in the mountainous permafrost of North-Eastern Eurasia by the example of the giant Anmangynda aufeis // *Catena*, 2023, p. 107530. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107530>

References

- Alekseev V. R.** Landscape indication of aufeis phenomena. Siberian Branch of Nauka Publishing House, Novosibirsk, 2005, 364 p. (in Russian)

- Alekseev V.R.** Long-term variability of the spring taryn-aufeis // *Ice and Snow*, 2016, vol. 56, No. 1, p. 73-92. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-73-92> (in Russian)
- Alekseyev V.R., Gorin V.V., Kotov S.V.** Taryn aufeis in the Northern Chukotka // *Ice and Snow*, 2011, No. 4, p. 85-93 (in Russian)
- Alekseev V.R., Makarieva O.M., Shikhov A.N. et al.** Atlas of giant aufeis-taryn of the North-East of Russia (2013-2019) // *Geography and natural resources*, 2023, No. 3, p. 136-143 (in Russian)
- Atlas** gigantских наледей-тарьнов Северо-Востока России [Atlas of the giant aufeis-taryns of the North-East of Russia]. Alekseev V. R., Makarieva O. M., Shikhov A. N. **et al.** Edited by V. V. Shepelev, M. N. Zheleznyak. Novosibirsk. Publishing House of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 2021, 302 p. (in Russian).
- Atlas** of snow and ice resources of the World. Moscow: IG RAS, 1997, 341 p. (in Russian)
- Afanasenko V.E., Koresha M.M., Romanovsky N.N.** Glacial landscapes of the North-East of the USSR. In: Materials of the VI Congress of Geogr. USSR: Problems of landscape studies. L., 1975, p. 78–81.
- Balobaev V.T., Gavrilova M.K., Skachkov Yu.B. et al.** The review of conditions and tendencies of climate changes in Yakutia. Edited by Philipova L.P. Yakutsk. YB of the SD RUS Publishing House, 2003, 64 p. (in Russian)
- Hydrogeology of the USSR.** Ed. by A.I. Efimov, I.K. Zaitsev. Moscow, Nedra, Vol. 20: Yakut ASSR, 1970, 383 p. (in Russian)
- Hydrogeology of the USSR.** Ed. by O.N. Tolstikhin. Moscow, Nedra, Vol. 26: North-East of the USSR, 1972, 297 p. (in Russian).
- Zemlianskova A.A., Alekseev V.R., Shikhov A.N. et al.** Long-term dynamics of the huge Anmangynda aufeis in the North-East of Russia (1962–2021). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (1), pp. 71-84. (In Russian)

- Zonov B. V.** Aufeis and polynyas on the rivers of the Yana-Kolyma Mountain country. In: Proceedings of the Obruchev Permafrost Institute of the USSR Academy of Sciences. Moscow, Publishing of the USSR Academy of Sciences, 1944, vol. IV. p. 33-92 (in Russian).
- Koreisha M. M.** Regularities of the development of land ice in a sharply continental climate: abstract. PhD dis. ... of Geographical Sciences. Institute of Geography, The Academy of Sciences of the Soviet Union. Moscow, 1986. 45 p. (in Russian).
- Kuznetsov A. S.** Aufeis and polynyas in the North-East of the USSR. In: Collection of works on hydrology. Leningrad, Hydrometeoizdat, 1962, No. 2, p. 72-86 (in Russian).
- Makarieva O.M., Alekseev V. R., Shikhov A.N. et al.** Ice Mapping of the North-East of Russia. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2022, vol. XXVI, No. 4, p. 47-58. DOI: 10.15372/KZ20220404 (in Russian).
- Makarieva O.M., Nesterova N.V.** Phase State of Precipitation as a Factor of Low Flow in the Yana and Indigirka River Basins // Russian Meteorology and Hydrology, 2020, Vol. 45, No. 4, pp. 276–282, DOI: 10.3103/S1068373920040081 (in Russian)
- Makarieva O. M., Shikhov A. N., Ostashov A. A., Nesterova N. V.** Aufeis of the Indigirka River basin according to modern Landsat images and historical data. Led i sneg [Ice and Snow], 2019, vol. 59, No. 2. p. 201-212 (in Russian).
- Markov M.L., Vasilenko N.G., Gurevich E.V.** Icing fields of the BAM zone: expeditionary investigations. SPb.: Nestor-History, 2016, 320 p. (in Russian).
- Pomorsev E.P., Kashkarov V.F., Popov V.F.** Ice field: global warming and processes of ice formation (rhythmic basis of long-term prognosis). Vestnik of Yakut State University, 2010. Vol, 7(2), pp. 40–48.

Romanovsky N.N. About geological activity of aufeis. In: Permafrost Studies. Moscow, Russia: Moscow State University; 1973, Issue 13, pp. 66–89. (in Russian)

Romanovsky N.N. Groundwater of cryolithozone. Moscow, Russia: Moscow State University; 1983, 232 pp.

Romanovsky N.N., Kondratieva K.A., Kudryavtsev V.A. et al. Permafrost and hydrogeological features of the area of the Deputatsky ore cluster. In: Permafrost Studies. Moscow, Russia: Moscow State University; 1970, Issue 10, pp. 34–58. (in Russian)

Certificate of state registration of the database No.2021620267 (dated 12.02.2021a). Naledi Severo-Vostoka Rossii: GIS katalog dlya Chukotskogo poluostrova [Aufeis of the North-East of Russia: GIS catalog for the Chukchi Peninsula]. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A. **et al.** (in Russian).

Certificate of state registration of the database No.2021620317 (dated 02.24.2021b). Naledi Severo-Vostoka Rossii: GIS katalog dlya bassejna reki Indigirka [Aufeis of the North-East of Russia: GIS catalog for the Indigirka River basin]. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A **et al.** (in Russian).

Certificate of state registration of the database No.2021620332 (dated 02.26.2021b). Naledi Severo-Vostoka Rossii: GIS katalog dlya bassejna reki Kolyma [Aufeis of the North-East of Russia: GIS catalog for the Kolyma River basin]. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A **et al.** (in Russian).

Certificate of state registration of the database No. 2021620333 (dated 02.26.2021g). Naledi Severo-Vostoka Rossii: GIS katalog dlya bassejna reki Yana [Aufeis of the North-East of Russia: GIS catalog for the Yana River basin]. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A **et al.** (in Russian).

Simakov A. S., Shilnikovskaya Z. G. Karta naledej Severo-Vostoka SSSR. Kratkaya ob'yasnitel'naya zapiska [Map of aufeis in the North-East of the USSR. A brief explanatory note]. North-Eastern Geological Department of the Main

Department of Geology and Subsoil Protection under the Council of Ministers of the RSFSR. Magadan, 1958, 40 p. (in Russian).

Sokolov B.L. Naledi i rechnoj stok [Aufeis and river runoff]. Leningrad, Hydrometeoizdat, 1975, 190 p. (in Russian).

Sokolov B. L., Sarkisyan V. O. Groundwater feeding of mountain rivers. L., Gidrometeoizdat, 1981, 239 p. (in Russian)

Tolstikhin O. N. Aufeis and Underground Water in the North-Eastern Regions of the USSR. Nauka, Novosibirsk, 1974, 164 p. (in Russian)

Shepelev V.V. Assessment of aufeis power and aufeis runoff of the Moma and Tikhon-Yuryakh river basins (tributaries of the Indigirka). In: Geocryological and hydrological studies of Siberia. Yakutsk, Publishing House, 1972, p. 187–190 (in Russian).

Shvetsov P. F., Sedov V.P. Giant aufeis and underground water in the Tas-Khayakhtakh ridge. Publishing House of the USSR Acad. Sci. Moscow–Leningrad, 1941, 81 p. (in Russian)

Bring A., Fedorova I., Dibike Y. et al. Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects and research challenges // Journal of Geophysical Research, Biogeosciences, 2016, 121, pp. 621-629, <https://doi.org/10.1002/2015JG003131op>.

Makarieva O., Nesterova N., Shikhov A. et al. Giant Aufeis—Unknown Glaciation in North-Eastern Eurasia According to Landsat Images 2013–2019 // Remote Sensing, 2022, 14, pp. 4248, <https://doi.org/10.3390/rs14174248>

Makarieva O., Nesterova N., Post D. et al. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost // The Cryosphere, 2019, 13, pp. 1635–1659, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1635-2019>

- Melnikov V., Osipov V., Brouchkov A. et al.** Past and Future of Permafrost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure // *Energies*, 2022, 15, pp. 3190, <https://doi.org/10.3390/en15093190>.
- Spence C., Kokelj S.V., Ehsanzadeh E.** Precipitation trends contribute to streamflow regime shifts in northern Canada—cold region hydrology in a changing climate // IAHS Publication, Wallingford, UK, 2011, vol. 346, pp. 3–8.
- Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S.** Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // *Geophys. Res. Lett.*, 2016, 43, pp. 10764–10772.
- Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov, A. et al.** The impact of climate change on seasonal glaciation in the mountainous permafrost of North-Eastern Eurasia by the example of the giant Anmangynda aufeis // *Catena*, 2023, p. 107530. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107530>